



Analyse retard des mesures d'auscultation de barrages

Stéphane Bonelli

► To cite this version:

Stéphane Bonelli. Analyse retard des mesures d'auscultation de barrages. *Revue française de Géotechnique*, 2004, 108, pp.31-45. hal-00180731

HAL Id: hal-00180731

<https://hal.science/hal-00180731>

Submitted on 19 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse retard des mesures d'auscultation de barrages

Delayed response analysis of dam monitoring data

Stéphane Bonelli

Cemagref

Unité de recherche Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation

BP 31, F-13612 Aix en Provence Cedex 1

Tél 33 (0)4 42 66 99 10 Fax 33 (0)4 42 66 88 65

e-mail : stephane.bonelli@cemagref.fr

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, UPR CNRS 7051

31, chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille, France

RÉSUMÉ.

L'auscultation des barrages fournit des séries chronologiques de mesures qui doivent être analysées. Pour comprendre le comportement hydraulique de l'ouvrage, il est essentiel de représenter les effets différés dus à la diffusion en milieu poreux. Un modèle permettant une analyse retard des mesures de pression interstitielle est présenté. Il est basé sur une représentation approchée de la réponse impulsionnelle de l'ouvrage permettant de reconstituer les variations mesurées qui sont provoquées par le niveau de la retenue et par la pluie. Après une analyse théorique, le modèle est comparé à des solutions exactes d'un problème de diffusion linéaire, puis appliqué à l'analyse de quelques mesures d'auscultation de trois barrages.

MOTS-CLES : milieu poreux, pression interstitielle, effet différé, réponse impulsionnelle, barrage, auscultation, série chronologique, ARMA.

ABSTRACT.

Long series of monitoring data are obtained during the routine operation of a dam. To understand the long term behaviour of a dam, it is essential to carefully interpret the dissipative effects which tend to occur due to seepage, in order to be able to distinguish between the effects of factors such as drift, irreversible events and the ageing of the dam and the effects of other factors not involving ageing processes. A model for performing delay analysis on pore pressure measurements is presented. The method involves the use of an

approximate impulse response accounting for the contribution of non-ageing factors, i.e., the reservoir level and rainfall events, to the pore-pressure variations. Following theoretical analysis, the model is compared with closed-form solution of a diffusion problem, and finally applied to three dams studies.

KEY WORDS : porous media, pore pressure, delayed effect, impulse response, dam, monitoring, time series, ARMA.

INTRODUCTION

Les méthodes statistiques de type Hydrostatique-Saison-Temps (également appelées Hydrostatic-Season-Time ou HST) ont été proposées dans les années 1960 pour analyser les mesures de déplacements issues de pendules de barrages voûtes (Ferry et Willm, 1958 ; Willm et Beaujoint, 1967 ; Lugiez et al., 1970). Ces méthodes sont actuellement utilisées dans plusieurs pays, pour analyser d'autres types de mesures (Guedes et Coehlo, 1985 ; Silva Gomes et Silva Matos, 1985 ; Crépon et Lino, 1999 ; Carrère et al., 2000). L'expérience acquise depuis quelques décennies sur plusieurs centaines de barrages a confirmé l'excellence de l'approche comme un outil puissant d'interprétation des mesures d'auscultation. La littérature ne fait toutefois pas état d'une méthode opérationnelle tenant compte des effets différés, qui permettrait d'analyser les mesures hydrauliques, influencées par le niveau de la retenue et par la pluie.

Les effets différés sont dus à un comportement dissipatif : l'écoulement en milieu poreux. La nécessité de considérer ces effets est bien connue (Lugiez et al., 1970). La prise en compte de la réponse impulsionnelle d'un milieu poreux semi-infini a permis quelques analyses retard de l'influence de la retenue sur des cellules de pression interstitielle dans un noyau de barrage (Poupart, 1994), mais l'analyse et son interprétation restent délicates. Cet article propose un modèle retard destiné à reconstituer les pressions interstitielle mesurées dans les barrages ou ses abords, et influencées par la retenue ou par la pluie. Ce modèle est basé sur la réponse impulsionnelle de l'ouvrage (également appelée Impulse-Response-Function ou IRF).

La première partie analyse les lacunes de l'approche classique. Elle démontre la nécessité de prendre en compte les effets différés lors de l'analyse des mesures de pression interstitielle. La seconde partie est consacrée à la représentation externe d'un problème parabolique linéaire : représentation exacte à partir de la fonction de Green et représentation approchée à partir d'un modèle retard exponentiel (exponential-IRF). Une solution exacte originale

bidimensionnelle, présentée dans la troisième partie, permet de valider l'approche, et de donner une signification mécanique aux paramètres du modèle. L'application à l'analyse de quelques mesures d'auscultation de trois barrages est présentée dans la dernière partie.

NECESSITE D'UNE ANALYSE RETARD

Lacu`es du modèle Hydrostatic-Season-Time

Le modèle HST est basé sur trois effets. Le premier est l'effet hydrostatique, qui rend compte des variations H de la mesure provoquées par la retenue. Il est représenté par un polynôme - souvent d'ordre quatre - du niveau de la retenue à l'instant t :

$$H(t) = b_1 z(t) + b_2 z^2(t) + b_3 z^3(t) + b_4 z^4(t), \quad z(t) = \frac{Z(t) - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (1)$$

où Z_{\min} est un niveau minimum (cote du tapis drainant par exemple) et Z_{\max} un niveau maximum (cote de la crête, ou cote d'exploitation normale par exemple). Le second effet est la date dans l'année, qui rend compte des variations saisonnières S de la mesure, de périodes douze mois et six mois. Il est représenté par les deux premiers termes d'un développement en série de Fourier :

$$S(t) = A_1 \sin(\omega_a(t + d_1)) + A_2 \sin(2\omega_a(t + d_2)), \quad \omega_a = \frac{2\pi}{\Delta T_a} \quad (2)$$

où ω_a est la pulsation annuelle (ΔT_a correspond à un an). Le troisième effet rend compte de l'influence du temps, dont le vieillissement. Son expression est variable, et dépend du phénomène étudié. Cet effet est souvent dénommé « effet irréversible ».

Cette approche est classique en analyse de données. Elle est utilisée dans de nombreux autres domaines (Young, 1998). L'un des plus anciens exemples connus est l'ajustement sinusoïdal de Forbes (1846) pour reproduire les variations cycliques de la température du sol. Pour les barrages, l'approche est robuste et conduit dans la plupart des cas à des résultats convenables. Elle comporte toutefois deux lacunes : 1) ses paramètres ont peu de sens mécanique, 2) elle ne tient pas compte de la structure particulière des séries chronologiques analysées.

L'expression polynomiale de l'influence de la retenue est historique. Elle est issue de la résistance des matériaux pour analyser des déplacements : l'influence de la pression hydrostatique sur les déplacements amont/aval d'un barrage voûte. Cette variable explicative est souvent utilisée *par défaut* pour l'analyse des mesures hydrauliques, mais une relation polynomiale de degré quatre (ou plus) entre un niveau piézométrique et le niveau de la retenue au même instant n'est pas mécaniquement justifiée.

Les effets saisonniers sont bien connus sur les barrages voûtes. Ils correspondent à l'influence des écarts de température entre les saisons froides et les saisons chaudes sur les déplacements mesurés. Pour les mesures hydrauliques, cet effet est également constaté, notamment sur les barrages en terre destinés à l'alimentation en eau ou à l'irrigation. Lorsque l'exploitation de la retenue est saisonnière, la composante hydrostatique et la composante saisonnière sont fortement corrélées. Dans ce cas, l'analyse statistique et son interprétation deviennent délicates.

La prise en compte de la pluie est nécessaire pour analyser les mesures hydrauliques. Elle concerne tous les barrages : les abords sont toujours auscultés par des piézomètres. Une méthode simple est de prendre la pluie cumulée sur les dix derniers jours (Crépon et Lino, 1999). La prise en compte de cumuls sur plusieurs périodes antérieures peut conduire à de bons résultats (Bonelli et al., 1998), mais l'approche demeure purement statistique.

Exemples de mesure avec effet retard

La figure 1 illustre un exemple de mesure piézométrique sur la plate-forme aval d'un barrage. A priori, les variations des premières années sont proportionnelles au niveau de la retenue (figure 1a), ce qui devrait se traduire par une relation linéaire entre variation piézométrique et variation de la retenue. Il n'en est rien (figure 1b), et un polynôme du type (1), même d'ordre élevé, n'en rendrait pas compte. De plus, si la périodicité des mesures est indépendante des variations de la retenue (ce qui est souvent le cas en pratique), ces variations pourront être statistiquement et accidentellement bien expliquées par le modèle instantané polynomial (1), sans aucun fondement mécanique. En effet, lorsque les diminutions sont lentes du fait de l'exploitation, les mesures sont nombreuses. Lorsque les hausses sont rapides du fait de précipitations importantes, les mesures sont rares. L'ajustement sera alors réalisé sur les mesures les plus nombreuses, et le résultat ne sera pas interprétable.

La figure 1 montre qu'un cycle de hausse/diminution du niveau de la retenue est dissipatif (hystérésis) : le trajet n'est pas le même pour une hausse (phase 3) et pour une diminution (phase 5). Certaines mesures peuvent indiquer une augmentation de pression interstitielle pendant que le niveau du réservoir décroît, et inversement. Ce phénomène bien connu est dû à la capacité d'emmagasinement : variation de porosité ou présence d'air. Il est constaté sur ouvrage (Kjaernsli et al., 1982 ; Myrvoll et al., 1985) et a été reproduit en laboratoire (Windish et Høeg, 2000). Cet exemple illustre ce qu'est l'effet retard et le fait que le modèle (1) ne peut en rendre compte. Il sera repris ultérieurement.

Figure 1

Nécessité d'une description externe

Les analyses des mesures d'auscultation traitent un grand nombre de données et constituent un élément de décision pour évaluer la sécurité de l'ouvrage. Il est fondamental qu'elles soient faites périodiquement, dans un délai court. Afin de quantifier les évolutions à conditions constantes (dont le vieillissement), il faut au préalable être capable de rendre compte des évolutions indépendantes du temps, uniquement dues aux sollicitations extérieures (variations de la retenue et précipitations). La description interne par variables d'état conduit à des modèles à grand nombre d'inconnues, souvent basés sur la méthode des volumes finis ou des éléments finis. Cette approche est réservée aux grands ouvrages. Pour les abords (rives, appuis, plate-forme aval) également auscultés, de telles modélisations sont mal adaptées : il est difficile – voire impossible - d'accéder aux caractéristiques géométriques et matérielles.

Une description externe basée sur les réponses impulsionnelles ne nécessite aucune connaissance préalable de la géométrie du barrage ni des propriétés des matériaux. Les ouvrages spécialisés en traitement du signal et en automatique contiennent les bases des méthodes et leurs résultats (Roïtenberg, 1974 ; Faure et Robin, 1984 ; Santamaria et Fratta, 1998). Nous utiliserons une description basée sur la réponse impulsionnelle de l'ouvrage (Impulse-Response-Function ou IRF).

L'utilisation de réponses impulsionnelles dans un cadre linéaire doit permettre de vérifier quelques propriétés. Le modèle doit être stationnaire (invariant par translation de l'origine des temps). Le temps n'a qu'une dimension cinématique caractéristique des phénomènes dissipatifs (au sens de l'enchaînement des événements à une certaine vitesse), mais pas de dimension géologique (au sens où l'origine des temps, donc l'âge du système, n'intervient pas). La quantification des effets stationnaires est une question fondamentale de l'analyse des mesures d'auscultation (Fanelli et al., 2000). Le terme « non stationnaire » nous semble plus pertinent que le terme « irréversible » pour qualifier les effets du temps : les phénomènes dissipatifs comme l'écoulement en milieu poreux peuvent correspondre à une évolution stationnaire *et* irréversible. Ce caractère dissipatif impose de considérer l'histoire des sollicitations pour expliquer les niveaux à un instant donné, et non la seule valeur de ces sollicitations au même instant. Par ailleurs, un phénomène essentiel doit être reproduit : l'accommodation. La réponse en régime permanent à un signal sinusoïdal (essai harmonique)

doit être un signal sinusoïdal (accommodation) de même période, déphasé et d'amplitude différente. L'accommodation est exactement ce que vise à modéliser la variable saisonnière du modèle Hydrostatic-Season-Time. On peut s'attendre à ce qu'une variable explicative décrite par une réponse impulsionnelle constitue une avancée pour reproduire les variations saisonnières des mesures hydrauliques.

REPRESENTATION EXTERNE D'UN PROBLEME PARABOLIQUE

Représentation externe exacte

Par souci de simplicité, nous parlerons indifféremment de pression interstitielle, de charge hydraulique ou de niveau piézométrique. On considère le problème parabolique linéaire anisotrope suivant :

$$c \frac{\partial p}{\partial t}(r, t) - \nabla \cdot (\underline{K} \cdot \nabla p(r, t)) = 0 \text{ dans } \Omega, \quad (3a)$$

$$p(r, 0) = p_0(r) \text{ dans } \Omega, \quad (3b)$$

$$p(r, t) = p_1(t) \text{ sur } \Gamma_1, \quad -\underline{n} \cdot \underline{K} \cdot \nabla p(r, t) = q(t) \text{ sur } \Gamma_2, \quad (3c)$$

$$p(r, t) = 0 \text{ sur } \Gamma_3, \quad -\underline{n} \cdot \underline{K} \cdot \nabla p(r, t) = 0 \text{ sur } \Gamma_4 \quad (3d)$$

où $p(r, t)$ est la charge hydraulique, fonction des coordonnées spatiales r et du temps t , Ω est un milieu poreux de frontière $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4$, de capacité c et de conductivité hydraulique anisotrope \underline{K} , \underline{n} étant la normale unitaire extérieure à Γ . On suppose pour simplifier que la condition initiale (3b) vérifie les conditions aux limites (3c,d) à l'instant initial. Cette hypothèse ne nuit pas à la généralité des présents raisonnements : si tel n'était pas le cas, d'autres termes se rajouteraient à la description. Une représentation de la solution du problème (3) peut être déduite de résultats classiques (Roach, 1970 ; Beck et al., 1992) :

$$p(r, t) = p_0(r) + h_0(r, t, p_0) * u(t) + h_1(r, t) * p_1(t) + h_2(r, t) * q(t) \text{ dans } \Omega \quad (4)$$

avec

$$h_0(r, t, p_0) = -\frac{1}{c} \int_{\Omega} g(r, r', t) \nabla_{r'} \cdot (\underline{K} \cdot \nabla_{r'} p_0(r')) dr', \quad (5a)$$

$$h_1(r, t) = -\frac{1}{c} \int_{\Gamma_1} \underline{n}(r') \cdot \underline{K} \cdot \nabla_{r'} g(r, r', t) dr', \quad (5b)$$

$$h_2(r, t) = -\frac{1}{c} \int_{\Gamma_2} g(r, r', t) dr' \quad (5c)$$

où $g(r, r', t)$ est la fonction de Green associée au problème (3). L'opérateur « * » est le produit de convolution temporelle défini sur des grandeurs causales :

$$(h * a)(t) = \int_0^t h(t-t')a(t')dt' = \int_0^t h(t')a(t-t')dt' \quad (6)$$

et $u(t)$ est l'échelon de Heaviside ($u(t) = 0$ si $t < 0$, $= 1$ si $t > 0$). La représentation (4) est assimilable à une description externe où h_0 est la réponse impulsionnelle à la condition initiale dans Ω , h_1 est la réponse impulsionnelle à la sollicitation de Dirichlet p_1 sur Γ_1 et h_2 est la réponse impulsionnelle à la sollicitation de Neumann q sur Γ_2 .

Représentation externe par un modèle retard exponentiel

L'approximation la plus simple des réponses impulsionnelles (5) est donnée par l'exponentielle :

$$R(\alpha, \eta, t) = \frac{\alpha}{\eta} e^{-\frac{t}{\eta}} u(t). \quad (7)$$

La solution $p(r, t)$ sera alors approchée par :

$$P(r, t) = p_0(r) + \sum_{j=0}^2 R(\alpha_j(r), \eta_j(r), t) * a_j(t) \quad (8)$$

où $(a_0, a_1, a_2) = (u, p_1, q)$. L'intérêt de l'approximation (8) est que l'on a localisé la description. Toute l'information relative à la structure spatiale de la solution est portée par les champs $(\alpha_j(r), \eta_j(r))_{r \in \Omega}$. Si l'on connaît ces derniers, on peut reconstituer l'évolution temporelle du champ $(P(r, t))_{r \in \Omega}$. Pour reconstituer l'évolution temporelle de $P(r^*, t)$ en un seul point r^* fixé (celui de l'instrument), il suffit de connaître $(\alpha_j(r^*), \eta_j(r^*))$. La connaissance de $P(r, t)$ en d'autres points du domaine n'est pas nécessaire pour reconstituer $P(r^*, t)$, contrairement à une méthode locale de type volumes-finis ou éléments-finis. C'est cette propriété qui rend l'approche externe bien adaptée à un problème de nature inverse : il n'est pas nécessaire d'explicitier la géométrie d'un problème aux limites. En contrepartie, les paramètres sont susceptibles d'avoir un sens mécanique moins direct.

La réponse indicielle (réponse à un échelon de sollicitation) est donnée par :

$$R(\alpha, \eta, t) * u(t) = \alpha \left(1 - e^{-\frac{t}{\eta}} \right). \quad (9)$$

Le coefficient $\alpha_j(r)$ est égal à la valeur de $p(r,t)$ en régime permanent si la seule sollicitation non nulle a_j est un échelon. Le coefficient $\eta_j(r)$ est un temps caractéristique de diffusion. Son rôle est explicité par l'analyse harmonique :

$$R(\alpha, \eta, t) * \sin(\omega t) = g \sin(\omega t + \phi), \quad g = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + (\omega \eta)^2}}, \quad \tan \phi = \omega \eta \quad (10)$$

qui fait apparaître le coefficient d'amortissement g et le déphasage ϕ pour une sollicitation harmonique de pulsation ω . Pour des sollicitations variant lentement ($\omega \eta \ll 1$), on obtient $g \approx \alpha$ et $\phi \approx \omega \eta$. Le temps caractéristique η quantifie alors le retard entre la sollicitation et la réponse, et α caractérise l'amortissement.

La transitoire (5.a) due aux conditions initiales est approchée, avec le modèle (7), par :

$$p_0(r) + R_0(\alpha_0(r), \eta_0(r), t) * u(t) = p_0(r) e^{-\frac{t}{\eta_0(r)}}. \quad (11)$$

Les variations imputables à la sollicitation $a_j(t)$ (de Dirichlet ou de Neumann) et approchées avec le modèle (7) sont :

$$R_j(\alpha_j(r), \eta_j(r), t) * a_j(t) = \alpha_j(r) A(a_j, \eta_j(r), 0, t) \quad (12)$$

où

$$A(a, \eta, t_0, t) = \frac{1}{\eta} \int_{t_0}^t a(t') e^{-\frac{t-t'}{\eta}} dt' \quad (13)$$

est solution de l'équation différentielle $\partial A / \partial t = (a - A) / \eta$.

Modèles d'analyse

L'instant initial $t = 0$ est assimilé à une date pertinente comprise entre la fin de construction et le début du premier remplissage. La grandeur mesurée est supposée influencée : 1) par l'état initial, avec un temps caractéristique η_0 ; 2) par le niveau de la retenue $\Delta Z(t) = Z(t) - Z_{\min}$, avec un coefficient d'influence α_Z et un temps caractéristique η_Z ; 3) par la pluviométrie $Q(t)$, avec un coefficient d'influence α_Q et un temps caractéristique η_Q . Dans ce cas, en un point r fixé (et omis pour simplifier), la forme générale d'un modèle exponential-IRF est :

$$P(t) = p_0 e^{-\frac{t}{\eta_0}} + \alpha_Z A(\Delta Z, \eta_Z, 0, t) + \alpha_Q A(Q, \eta_Q, 0, t) + T(t). \quad (14)$$

La variable explicative $T(t)$ représente les autres effets non stationnaires, dont la formulation sort du cadre des présents développements. On en déduit deux modèles. Le premier est adapté à l'analyse des premières années de vie du barrage pour lequel on suppose que $T(t)$ est négligeable :

$$P(t) = p_0 e^{-\frac{t}{\eta_0}} + \alpha_Z A(\Delta Z, \eta_Z, 0, t) + \alpha_Q A(Q, \eta_Q, 0, t). \quad (15)$$

Il apparaît de manière naturelle un effet non stationnaire : la dissipation des pressions interstitielles de construction p_0 . Cet effet peut être qualifié d'irréversible. Le second modèle est adapté à l'analyse en exploitation du barrage, à partir d'une date t_0 , suffisamment longtemps après sa première mise en eau ($t_0 \gg \eta_0$) :

$$P(t) = C + \alpha_Z A(\Delta Z, \eta_Z, 0, t) + \alpha_Q A(Q, \eta_Q, 0, t) + T(t) \quad (16)$$

où C est une constante égale à la valeur qui serait mesurée au début de la période d'analyse si les sollicitations avaient été nulles avant t_0 . Les cinq paramètres du modèle sont $(C, \alpha_Z, \alpha_Q$ (linéaires), η_Z, η_Q (non linéaires)). Puisque :

$$A(a, \eta, 0, t) = e^{-\frac{t-t_0}{\eta}} A(a, \eta, 0, t_0) + A(a, \eta, t_0, t) \quad (17)$$

on en déduit que

$$C = p_0 - \alpha_Z \beta_Z - \alpha_Q \beta_Q \quad (18)$$

avec

$$\beta_Z = A(\Delta Z, \eta_Z, 0, t_0), \quad \beta_Q = A(Q, \eta_Q, 0, t_0). \quad (19)$$

Pour une analyse en exploitation, il semble donc indispensable de connaître les sollicitations antérieures à t_0 puisque le produit de convolution intègre les variations depuis l'instant initial.

Toutefois, à l'aide de (18) et (19), on peut réécrire (16) sous la forme :

$$P(t) = I(t) + \alpha_Z A(\Delta Z, \eta_Z, t_0, t) + \alpha_Q A(Q, \eta_Q, t_0, t) + T(t) \quad (20)$$

avec

$$I(t) = p_0 - \alpha_Z \beta_Z \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\eta_Z}}\right) - \alpha_Q \beta_Q \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\eta_Q}}\right). \quad (21)$$

Cette fois les paramètres sont $(\beta_Z, \beta_Q, \alpha_Z, \alpha_Q$ (linéaires), η_Z, η_Q (non linéaires)). Il est donc possible de s'affranchir de la connaissance des sollicitations antérieures à la période d'analyse en considérant l'influence de ce passé récent comme une inconnue à travers (β_Z, β_Q) . En

contre partie, le modèle a un paramètre supplémentaire, linéaire. Le choix de l'intervalle d'analyse et de l'intervalle de calcul du produit de convolution fait apparaître de manière naturelle l'effet non stationnaire $I(t)$. Cet effet peut être qualifié d'irréversible, mais il n'est en aucun cas assimilable à une dérive ou à un vieillissement.

Le raisonnement général peut être repris pour inclure d'autres effets. Par exemple, dans le cas d'un niveau aval variable $\Delta V(t) = V(t) - Z_{\min}$ qui est une sollicitation de Dirichlet supplémentaire sur une partie de la frontière, le modèle (16) devient :

$$P(t) = C + \alpha_Z A(\Delta Z, \eta_Z, 0, t) + \alpha_V A(\Delta V, \eta_V, 0, t) + \alpha_Q A(Q, \eta_Q, 0, t) + T(t). \quad (22)$$

Discretisation temporelle

Les modèles ARMA (Auto Regressive Moving Average) sont bien adaptés à l'étude des séries chronologiques. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines (Young, 1998), mais encore peu appliqués aux problèmes du génie civil (Owen et al., 2001). Un modèle ARMA(p, q) consiste à décrire la mesure comme fonction linéaire de p valeurs passées de la réponse (moyenne autorégressive) et de q valeurs passées de la sollicitation (moyenne mobile). Nous allons montrer que le modèle exponentiel-IRF peut conduire à un modèle ARMA. Le retard exponentiel (7) permet d'écrire la récurrence :

$$A(a, \eta, t_0, t + \Delta t) = e^{-\frac{\Delta t}{\eta}} A(a, \eta, t_0, t) + A(a, \eta, t, t + \Delta t). \quad (23)$$

En intégrant deux fois par partie (13), il vient :

$$A(a, \eta, t, t + \Delta t) = a(t + \Delta t) - \eta \frac{\partial a}{\partial t}(t + \Delta t) - e^{-\frac{\Delta t}{\eta}} \left(a(t) - \eta \frac{\partial a}{\partial t}(t) \right) + \eta \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial^2 a}{\partial t^2}(t') e^{-\frac{t+\Delta t-t'}{\eta}} dt'. \quad (24)$$

Pour une description de la sollicitation en échelons $a(t) = a^{n+1}$ si $t^n \leq t < t^n + \Delta t^n$, on obtient, en notant $A^n = A(a, \eta, t^0, t^n)$, un modèle ARMA(1,1) :

$$A^{n+1} = (1 - \theta_1) A^n + \theta_1 a^{n+1}, \quad \theta_1 = 1 - e^{-\frac{\Delta t^n}{\eta}}. \quad (25)$$

Pour une description en rampes $a(t) = a^n + (t - t^n)(a^{n+1} - a^n)/\Delta t^n$ si $t^n \leq t \leq t^n + \Delta t^n$, on obtient un modèle ARMA(1,2) :

$$A^{n+1} = (1 - \theta_1) A^n + \theta_1 \theta_2 a^{n+1} + \theta_1 (1 - \theta_2) a^n, \quad (26a)$$

$$\theta_1 = 1 - e^{-\frac{\Delta t^n}{\eta}}, \quad \theta_2 = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\Delta t^n}{\eta}}} - \frac{\eta}{\Delta t^n}. \quad (26b)$$

On remarque que $0 < \theta_1 < 1$ et $1/2 < \theta_2 < 1$. Par ailleurs, $\theta_1 \rightarrow 1$ lorsque $\eta \rightarrow 0$: ce modèle intègre le cas particulier très important d'une réponse instantanée. On peut obtenir d'autres modèles ARMA(1,q) d'ordre q plus élevé en élevant le degré d'interpolation de la sollicitation. Toutefois, le nombre de paramètres d'ajustement reste constant, contrairement au cas d'une simple application d'un modèle ARMA(p,q) qui comporte $p + q$ paramètres. Dans les applications, la description de la pluviométrie sera en échelons (25), et la description de l'évolution du niveau de la retenue sera en rampes (26).

Identification du modèle

On peut obtenir une identification directe en explicitant (α_j, η_j) afin que les deux premiers moments temporels de h_j et de R_j soient égaux pour tout r . Cette identification est analytique et suppose que la fonction de Green soit connue. Le moment temporel d'ordre k d'un champ $a(r, t)$ est défini par :

$$M_k[a](r) = \int_0^\infty t^k a(r, t) dt = (-1)^k \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\partial^k \hat{a}}{\partial s^k}(r, s). \quad (27)$$

où $\hat{a}(r, s)$ est la transformée de Laplace de $a(r, t)$. On obtient dans le cas présent :

$$\alpha_j(r) = M_0[h_j](r), \quad \eta_j(r) = \frac{M_1[h_j](r)}{M_0[h_j](r)}. \quad (28)$$

Cette identification sera utilisée pour donner un sens mécanique aux paramètres.

Pour ajuster le modèle sur des mesures in situ, de nombreuses méthodes d'identification sont *a priori* possibles. Toutefois, le contrôle des sollicitations est impossible ; on ne peut pas accéder directement à la réponse impulsionnelle ou à la fonction de transfert. D'autre part deux raisons conduisent à ne pas réaliser l'identification dans le domaine fréquentiel : 1) les mesures sont susceptibles de comporter des périodes d'interruption (cette situation est souvent rencontrée pour les mesures d'auscultation de barrages) ; 2) le modèle peut être appliqué sur de longues périodes de temps, comprenant des évolutions non périodiques et non stationnaires. Nous sommes donc conduit à réaliser l'identification dans le domaine temporel. Elle est numérique et consiste à calculer les inconnues $(\alpha_j(r), \eta_j(r))$ qui minimisent l'écart entre la mesure $Y(r, t)$ et $P(r, t)$ en un point r fixé, et sur un intervalle de temps bien choisi. Le choix de cet intervalle de temps peut être motivé par différentes raisons : élimination des transitoires dues à la condition initiale, analyse d'une période particulière de l'ouvrage, identification du modèle sur une période récente, afin de permettre une prévision des mesures

(en général sur les deux ans à venir). Si l'écart est mesuré par une norme quadratique, cette méthode conduit à un problème d'identification par moindres carrés, non linéaire sur les paramètres $(\eta_j(r))$.

ANALYSE SUR SOLUTION EXACTE

Problème bidimensionnel

Afin d'analyser la pertinence du modèle exponential-IRF, on considère le problème bidimensionnel suivant sur domaine rectangulaire $\{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y\}$ homogène anisotrope, pour lequel le repère $(0, x, y)$ coïncide avec les axes principaux d'anisotropie :

$$c \frac{\partial p}{\partial t}(x, y, t) - k_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x, y, t) - k_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}(x, y, t) = 0, \quad 0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad (29a)$$

$$p(x, y, 0) = 4p_{\max} \frac{x}{L_x} \left(1 - \frac{x}{L_x}\right), \quad (29b)$$

$$p(0, y, t) = p_1(t), \quad p(L_x, y, t) = 0, \quad -k_y \frac{\partial p}{\partial y}(x, L_y, t) = q(t), \quad \frac{\partial p}{\partial y}(x, 0, t) = 0 \quad (29c)$$

où c est la capacité, (L_x, L_y) sont les dimensions du domaine étudié et (k_x, k_y) sont les conductivités suivant $(0, x)$ et $(0, y)$. Ce problème peut être assimilable, sur une géométrie simplifiée, à un barrage homogène en terre ou au noyau d'un barrage zoné, soumis aux variations de la retenue $p_1(t)$ sur sa face amont, au drainage sur sa face aval, à la pluie sur sa crête, et reposant sur une fondation imperméable. La condition initiale peut être assimilable à un champ de pression interstitielle résultant de la construction par couches.

Une représentation de la fonction de Green de ce problème peut-être construite à partir de résultats fondamentaux classiques (Morse, 1953 ; Beck et al., 1992 ; Melnikov, 2000) :

$$g(x, x', y, y', t) = \frac{1}{L_x L_y} g_x\left(\frac{x}{L_x}, \frac{x'}{L_x}, \frac{t}{T_x}\right) g_y\left(\frac{y}{L_y}, \frac{y'}{L_y}, \frac{t}{T_y}\right) u(t), \quad (30a)$$

$$g_x(r, r', \tau) = \frac{1}{2} \left(\theta_3\left(\frac{\pi(r-r')}{2}, e^{-\pi^2 \tau}\right) - \theta_3\left(\frac{\pi(r+r')}{2}, e^{-\pi^2 \tau}\right) \right), \quad (30b)$$

$$g_y(r, r', \tau) = \frac{1}{2} \left(\theta_3\left(\frac{\pi(r-r')}{2}, e^{-\pi^2 \tau}\right) + \theta_3\left(\frac{\pi(r+r')}{2}, e^{-\pi^2 \tau}\right) \right) \quad (30c)$$

où (T_x, T_y) sont des temps caractéristiques définis par

$$T_x = \frac{cL_x^2}{k_x}, \quad T_y = \frac{cL_y^2}{k_y} \quad (31)$$

et où θ_3 est la fonction elliptique de troisième espèce

$$\theta_3\left(\frac{\pi\xi}{2}, e^{-\pi^2\tau}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(\xi-2k)^2}{4\tau}\right) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} \cos(k\pi\xi) e^{-(k\pi)^2\tau}. \quad (32)$$

Tra` satoire i` itiale

A l'aide de (5a), (28) et (30), l'identification directe conduit aux résultats exact suivants :

$$\alpha_0(x, y) = -p_0(x, y), \quad \eta_0(x, y) = \frac{1}{12} \left(-\left(\frac{x}{L_x}\right)^2 + \frac{x}{L_x} + 1 \right) T_x. \quad (33)$$

La transitoire exacte représentant la dissipation des pressions initiales est approchée avec une bonne précision par (11) et (33) (figure 2).

Figure 2.

Sollicitatio` de Dirichlet

A l'aide de (5b), (28) et (30), l'identification directe conduit aux résultats exact suivants :

$$\alpha_1(x, y) = 1 - \frac{x}{L_x}, \quad \eta_1(x, y) = \frac{x}{6L_x} \left(2 - \frac{x}{L_x} \right) T_x. \quad (34)$$

La réponse indicielle, représentant l'augmentation de pression provoquée par un échelon de retenue, est approchée avec une précision convenable par (9) et (34) (figure 3). La figure 4 montre la réponse à une sollicitation harmonique (10) pour $\omega T_x = 2\pi$. Trois aspects essentiels sont reproduits : 1) l'hystérésis d'un cycle de sollicitation (figure 4a); 2) pour une même valeur de la sollicitation, la réponse a une valeur différente suivant son évolution (figure 4b); 3) la réponse peut avoir une valeur supérieure à la sollicitation (figure 4b).

Le domaine de validité du modèle exponentiel-IRF (7) peut être estimé par les diagrammes logarithmiques (figure 5). Le gain et la phase sont correctement reproduits par les approximations (10) pour $\omega T_x \leq 10$ environ. La figure 5 met en évidence les limites du modèle : il ne peut pas rendre compte des harmoniques élevées des sollicitations.

Figure 3.

Figure 4.

Figure 5.

Sollicitatio` de Neuma`

A l'aide de (5c), (28) et (30), l'identification directe conduit à des expressions complexes sous forme de séries infinies. On peut déduire les résultats approchés suivants pour $T_y \geq T_x$:

$$\alpha_2(x, y) \approx \frac{4 \sin\left(\pi \frac{x}{L_x}\right) \cosh\left(\pi a \frac{y}{L_y}\right)}{a \pi^2 \sinh(\pi a)} \frac{L_y}{k_y}, \quad (35a)$$

$$\eta_2(x, y) \approx \frac{1}{2 \pi^2 a} \left(1 + \pi a - \pi a \frac{y}{L_y} \tanh\left(\pi a \frac{y}{L_y}\right) \right) \sqrt{T_x T_y} \quad (35b)$$

où $a = \sqrt{T_y / T_x}$ rend compte de l'influence de l'anisotropie et des dimensions caractéristiques. Le coefficient $\alpha_2(x, y)$ a la dimension d'un temps. Le temps caractéristique η_2 peut être considéré comme indépendant de x , mais il intègre l'influence de a , de nature bidimensionnelle. L'approximation (9) et (35), représentant l'augmentation de pression provoquée par un échelon de pluie, reproduit correctement la solution exacte en temps et en espace, dans les deux dimensions spatiales (figures 6,7,8 et 9). Pour un échelon de pluie, la vitesse d'évolution de la pression augmente avec a (figures 6a,7a,8a et 9a). La profondeur d'influence diminue avec a (figures 6b et 7b), de même que la valeur maximale de la pression (figures 8b et 9b).

Figure 6.

Figure 7.

Figure 8.

Figure 9.

Sig` ificatio` méca` ique des paramètres

Ayant noté (α_1, η_1, L_x) les grandeurs relatives à la description simplifiée (29), nous noterons (α_Z, η_Z, L_Z) les paramètres associés à la partie hydrostatique du modèle exponential-IRF, et identifiés sur mesures d'auscultation. Lorsque la description (29) est pertinente, le résultat (34) permet une interprétation mécanique. C'est en particulier le cas d'instruments situés dans le corps d'un barrage en terre ou dans le noyau d'un barrage zoné. La longueur L_Z peut être assimilée à une distance moyenne de drainage, entre la sollicitation (retenue parement amont), et l'exutoire (drain cheminé, tapis drainant, parement aval) (figure 10). Il est possible de vérifier la cohérence des grandeurs (x, L_Z) estimées sur plan et du paramètre α_Z identifié sur les mesures.

Figure 10.

Le coefficient d'amortissement statique α_Z contient deux informations : 1) l'efficacité du drainage (drain vertical, tapis drainant, puits de décompression) ou des dispositifs d'étanchéité (voiles d'injection); 2) la position de l'instrument sur le chemin de drainage par rapport au parement amont. Ce chemin de drainage peut-être supérieur au chemin représenté figure 10 en cas de colmatage du drain, lorsque la nappe atteint le parement aval. Un coefficient α_Z proche de l'unité signifiera que l'instrument est proche du parement amont (x petit) ou que l'exutoire est loin de la sollicitation (L_Z grand).

Le temps caractéristique local de l'influence de la retenue η_Z contient deux informations : 1) l'efficacité du drainage par l'intermédiaire du carré de L_Z ; 2) la diffusivité de la zone instrumentée $D = k / c$, grandeur matérielle qui dépend d'une perméabilité k et de la capacité c . Dans le cas anisotrope, l'interprétation est plus complexe. Toutefois, η_Z permet d'accéder à une estimation de cette diffusivité si L_Z est connue. A l'aide de (31) et (34), on obtient :

$$D = \frac{(1 - \alpha_Z^2)L_Z^2}{6\eta_Z}. \quad (36)$$

Un temps η_Z très grand caractérisera un sol très peu perméable, ou une longueur de drainage L_Z très importante. Un temps η_Z non nul caractérisera une capacité non nulle.

Dans les zones de marnage, le sol est susceptible d'être non saturé, ce qui explique une capacité non nulle. Dans les zones situées sous le niveau de la surface libre, cette capacité peut également être non nulle.

La compressibilité du sol peut être une première raison. Toutefois, les matériaux fins utilisés dans les barrages sont de faible plasticité (indice de plasticité $I_p < 35\%$), compactés à la mise en place donc sur-consolidés en partie haute. Par ailleurs, ils sont déjaugés sous la surface libre. En phase d'exploitation, dans le corps du barrage ou en aval de l'ouvrage et dans les terrains naturels, le sol travaille sous des sollicitations déjà subies. En première approximation, on peut donc considérer que, dans ce cadre, c'est le module de rigidité élastique tangent qui quantifie l'amplitude des variations de pression interstitielle provoquée par la déformation de la matrice solide. L'influence du couplage hydro-mécanique sur la capacité est probablement du second ordre.

La compressibilité du fluide interstitiel peut être la raison principale. St-Arnaud (1995) propose en particulier de prendre en compte le fait que l'eau dans le corps d'un barrage contienne, en plus de sa teneur en air naturelle issue de la retenue, de l'air emprisonné au moment de la mise en eau, en partie comprimé et en partie dissout. La partie dissoute est transportée à travers le corps du barrage et s'échappe à l'aval.

La conclusion est que la capacité peut ne pas être nulle sous la surface libre. Dans ce cas, les réponses en pression interstitielle à des sollicitations seront retardées. Ces réponses pourront toutefois être considérées comme instantanées pour des temps caractéristiques inférieurs au temps de réponse des appareils d'auscultation ou à la périodicité de mesure.

Nous noterons (α_Q, η_Q) les paramètres du modèle exponentiel-IRF relatifs à la pluie, et identifiés sur mesures d'auscultation. Les mesures réalisées dans le corps du barrage étant le plus souvent peu influencées par la pluie, l'interprétation mécanique de ces paramètres ne serait utile que pour des instruments situés en terrain naturel, dans les abords du barrage. Malheureusement, dans ce cas on dispose rarement de relevés ou de plans, et une interprétation ne peut être proposée sur la base du problème (29) et des résultats (35), beaucoup trop simplistes. On peut toutefois remarquer que α_Q a la dimension d'un temps indépendant de la capacité c . On peut assimiler α_Q à un temps de drainage, nécessaire pour que l'eau de pluie infiltrée arrive à l'exutoire le plus proche dans la zone auscultée par l'instrument. Plus l'eau infiltrée est évacuée rapidement, plus α_Q est petit et moins l'effet pluie influence le niveau mesuré. On remarque que si la seule connaissance de la diffusivité D suffit à caractériser la réponse à une sollicitation en charge, il est nécessaire de connaître la diffusivité *et* la perméabilité pour caractériser la réponse à une sollicitation en flux. Il est alors normal d'obtenir dans ce cas deux temps caractéristiques α_Q et η_Q , ce dernier étant le temps de diffusion relatif au point ausculté et à l'effet pluie.

APPLICATIONS

Analyse retard de l'effet retenue

Les mesures des instruments d'un barrage en terre homogène de 30 mètres de haut, avec tapis drainant horizontal, sont analysées avec le modèle (16) sans effet pluie. Le corps du barrage est en sable argileux (perméabilité comprise entre 10^{-5} et 10^{-7} m/s). Le talus aval est ausculté par sept piézomètres suivant trois coupes (figure 11a). L'axe du barrage est ausculté par six

cellules de pression interstitielle à cordes vibrantes sur trois coupes (figure 11b). Trois cellules sont situées en fondation.

Figure 11.

Le piézomètre évoqué figure 1 est situé en pied de parement aval (P1 figure 11a). Il est analysé en deux phases. L'ajustement du modèle exponentiel-IRF sur la phase de remplissage (150 jours) conduit à $\alpha_Z = 0.44$ et $\eta_Z = 83$ jours (figure 12). Sur la première phase d'exploitation (2280 jours), on obtient $\alpha_Z = 0.22$ et $\eta_Z = 159$ jours (figure 13). L'évolution de ces valeurs entre les deux phases peut s'expliquer par la saturation progressive du sol à la suite du premier remplissage. La figure 14 compare les mesures et le modèle pour la cellule CV13 située dans le corps du barrage (figure 11b). Les figures 12b, 13b et 14b montrent l'hystérésis sur un cycle hausse/diminution du niveau de la retenue, ainsi qu'un décalage de la réponse de l'ordre de grandeur du temps caractéristique η_Z .

Figure 12.

Figure 13.

Figure 14.

Le tableau 1 donne les résultats de l'analyse retard des six cellules (figure 11b), ainsi qu'une estimation de la diffusivité. Celle-ci est d'un ordre de grandeur supérieur dans les zones situées sous la surface libre (10^{-4} à 10^{-3} m²/s) par rapport aux zones de marnage (10^{-5} à 10^{-4} m²/s), susceptibles d'être non saturées et d'avoir une capacité moyenne plus élevée.

Le tableau 2 donne les résultats de l'analyse retard des piézomètres auscultant le talus aval (figure 11a). Ce tableau contient également les cellules auscultant l'axe du barrage, afin de vérifier la cohérence des résultats. Malgré la grande différence de principe entre les deux instruments, les diffusivités estimées sont du même ordre de grandeur. On peut l'expliquer par le fait que l'analyse intègre implicitement les informations relatives à une zone située entre le parement amont et l'instrument, plus étendue que la zone directement concernée par l'instrument. Le tableau 2 montre que la diffusivité semble plus importante en rive droite, ce qui peut correspondre à une perméabilité plus importante.

Tableau 1

Tableau 2

Analyse retard de l'effet pluie

L'analyse de quatre piézomètres de rive d'un barrage zoné situé dans une région où se produisent des précipitations courtes mais violentes permet d'évaluer le modèle pluie. Deux piézomètres sont situés en rive droite (PZ17 et PZ14) et deux autres en rive gauche (PZ18 et PA4). Le tableau 3 donne les résultats des analyses avec le modèle (16). L'influence de la retenue est instantanée ($\eta_Z \approx 0$). Les parts explicatives sont calculées à partir des résidus partiels, et correspondent au ratio variation de la variable explicative/variation totale. L'influence de la pluie est importante (de 19% à 52% des variations mesurées). Une étude théorique complémentaire ainsi qu'une bonne connaissance de l'ouvrage sont nécessaires pour interpréter les temps caractéristiques (α_Q, η_Q). La reconstitution des variations est convenable et montre les pics provoqués par la pluie (figure 15a). Les graphes relatifs à l'effet pluie sont tracés figure 15b, où $P_Q(t) = \alpha_Q A(Q, \eta_Q, 0, t)$ et $Y_Q(t) = P_Q(t) + Y(t) - P(t)$. Ce modèle pluie apparaît comme perfectible car il ne reproduit que quelques pics et quelques creux de piézométrie.

L'utilisation du modèle retard pour l'effet pluie représente un progrès, mais les résultats ne sont pas aussi bons que pour l'effet retenue. On peut avancer trois raisons à cela : 1) toute la pluie ne s'infiltre pas, les quantités d'eau de pluie infiltrées et ruisselées dépendent de l'importance des précipitations, de la pente et de la perméabilité du terrain; 2) le chemin d'écoulement de l'eau infiltrée débute à la surface, et passe par une zone non saturée, mal expliquée par un modèle linéaire à diffusivité constante ; 3) la pluviométrie peut comporter des harmoniques élevées, mal prises en compte par le modèle exponentiel ($\omega T_Q > 10$).

Figure 15

Tableau 3

Analyse retard des effets de la retenue et de la pluie.

Les données d'auscultation d'un barrage homogène de 15,5 mètres de haut sont analysées avec le modèle (16). La fondation est constituée d'arènes granitiques (perméabilité comprise

entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s). Elle est étanchée par un voile d'injection. Le remblai comporte des arènes (perméabilité comprise entre 10^{-7} et 10^{-8} m/s) et un drain cheminée. Les treize piézomètres à lecture directe auscultent les abords du barrage (figure 16a). Les six cellules de pression interstitielle à corde vibrante sont situées dans l'axe de l'évacuateur (figure 16b).

Figure 16

Le tableau 4 donne les résultats des analyses des six cellules à cordes vibrantes, qui ne sont pas influencées de manière significative par la pluie. L'influence de la retenue est instantanée pour les trois cellules situées à l'interface avec la fondation, et retardée pour les trois cellules situées dans le corps du barrage, dans la zone de marnage. Le rabattement de la nappe phréatique est mis en évidence par la décroissance de α_Z de l'amont vers l'aval.

Le tableau 5 donne les résultats des analyses des treize piézomètres. L'influence de la retenue est peu retardée, sauf pour le piézomètre PD8 qui doit être interprété à partir de la connaissance de l'ouvrage. Le bon fonctionnement du voile d'étanchéité est illustré par la décroissance de α_Z des rives vers le fond de vallée. Son contournement est illustré par des valeurs de α_Z proche de un en haut des rives. Les piézomètres situés en fond de vallée sont fortement influencés par la pluie (PD4,5,6 et PG3,4), contrairement à ceux situés sur les pentes (PD1,2,3 et PG1,2), où la pluie ruisselle plus qu'elle ne s'infiltre. Le comportement du piézomètre PG5 est singulier : influence modérée de la retenue et forte influence de la pluie. Ceci peut être imputable à la présence d'une nappe de coteau détectée lors de la construction du barrage.

Tableau 4

Tableau 5

CONCLUSION

La littérature ne fait pas état d'une méthode opérationnelle qui permettrait d'analyser efficacement les pressions interstitielles mesurées sur les barrages, en fonction du niveau de la retenue et de la pluie. Les méthodes classiques d'analyse des séries chronologiques de type ARMA (Auto Regressive Moving Average), bien que d'usage courant dans d'autres

domaines, sont rarement utilisées pour analyser les mesures d'auscultation de barrage. Nous proposons une méthode basée sur la réponse impulsionnelle (Impulse-Response-Function ou IRF). Le cas d'un retard exponentiel (exponential-IRF) est développé. Ce modèle est pertinent pour des écoulements à diffusivité peu variable, sous des sollicitations à variations lentes vis à vis du temps caractéristique de diffusion. Il reproduit quelques aspects essentiels de l'effet différé : dissipation, accommodation (retard et amortissement) sous sollicitation cyclique, évolution fonction de l'histoire des sollicitations.

L'analyse des mesures d'auscultation de trois barrages montre que tous les instruments, cellules à cordes vibrantes dans le corps du barrage et piézomètres auscultant le corps du barrage, la fondation, les appuis et les rives sont a priori susceptibles d'exhiber un effet retard vis à vis du niveau de la retenue. Les piézomètres auscultant les rives peuvent être significativement influencés par la pluie. Les temps caractéristiques de diffusion sont de l'ordre de quelques jours à quelques mois.

L'IRF est intimement liée à la fonction de Green du problème aux limites de diffusion linéaire associé. Ceci permet de donner un sens mécanique au modèle IRF à partir des moments temporels. Il est en particulier possible d'estimer quelques valeurs de diffusivité hydraulique du corps du barrage. Elles sont de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} m²/s.

Le modèle exponential-IRF conduit une équation de récurrence permettant une mise en œuvre numérique simple des produits de convolution. Ce modèle ne nécessite pas la connaissance de l'histoire des sollicitations antérieures à la période d'analyse. La formulation discrète en temps est assimilable à un modèle de type ARMA(1, q) où q est le degré d'interpolation de la sollicitation. Ceci ouvre des perspectives quant à la possibilité d'utiliser des méthodes modernes pour analyser les mesures d'auscultation de barrages.

REFERENCES

Beck J.V., Cole K.D., Haji-Sheikh A., Litkouhi B. Heat Conduction Using Green's Functions, Hemisphere, Washington, DC, 1992.

Bonelli S., Félix H., Tourment R. Interprétation des mesures d'auscultation des barrages par régression linéaire multiple HST. Fiabilité des matériaux et des structures, Hermès, 1998, pp. 188-198.

- Carrère A., Colson M., Goguel B., Noret C. Modelling: a means of assisting interpretation of readings. XXth International Congress on Large Dams, Beijing, vol. III, ICOLD, 2000, pp. 1005-1037.
- Crépon O., Lino M. An analytical approach to monitoring. International Water Power & Dam Construction, June, 1999, pp. 52-54.
- Fanelli M., Giuseppetti G., Mazza G. Analysis of the phenomenon of time drift in the observational data of dam behaviour. XXth International Congress on Large Dams, Beijing, vol. III, ICOLD, 2000, pp. 1083-1098.
- Faure P., Robin M. Éléments d'automatique, Dunod, 1984, 443 p.
- Ferry S., Willm G. Méthodes d'analyse et de surveillance des déplacements observés par le moyen de pendules dans les barrages. VIth International Congress on Large Dams, New-York, vol. II, ICOLD, 1958, pp.1179-1201.
- Forbes, J.D. Account of some experiments on the temperature of the earth at different depths and in different soils near Edinburgh. Transactions of The Royal Society of Edinburgh, vol. 16, 1846, pp. 189-236.
- Guedes Q.M., Coelho P.S.M. Statistical behaviour model of dams. XVth International Congress on Large Dams, Lausanne, vol. I, ICOLD, 1985, pp. 319-334.
- Kjaernsli B., Kvale G., Lunde J., Baade-Mathiesen J. Design, construction, control and performance of the Svartevann earth-rockfill dam. XIVth International Congress on Large Dams, Rio de Janeiro, vol. IV, ICOLD, 1982, pp. 319-349.
- Lugiez F., Beaujoint N., Hardy X. L'auscultation des barrages en exploitation au service de la production hydraulique d'Électricité de France, des principes aux résultats. Xth International Congress on Large Dams, Montréal, vol. III, ICOLD, 1970, pp. 577-600.
- Melnikov Yu.A. An alternative construction of Green's functions for the two-dimensional heat equation. Engineering Analysis with Boundary Elements, n°24, 2000, pp. 467-475.
- Myrvoll F., Larsen S., Sande A., Romsol N.B. Field instrumentation and performance observations for the Vatnedalsvatn dams, XVth International Congress on Large Dams, Vol. I, Lausanne, ICOLD, 1985, pp. 1039-1069.
- Morse P.M., Feshbach H. Methods of Theoretical Physics: Parts I and II. New York, McGraw-Hill, 1953.

Owen J.S., Eccles B.J., Choo B.S., Woodings M.A. The application of auto-regressive time series modelling for the time-frequency analysis of civil engineering structures. *Engineering Structures*, n°23, 2001, pp. 521-536.

Poupart M. Contrôle de la sécurité par l'auscultation, apport de la télémessure et des méthodes de dépouillement des mesures. XVIIIth International Congress on Large Dams, Durban, vol. V, ICOLD, 1994, pp. 74-79.

Roach G. F. Green's functions, introductory theory with applications. Van Nostrand Reinhold company, 1970, 279 p.

Roïtenberg I.N. Théorie du contrôle automatique. MIR, Moscou, 1974, 494 p.

Santamaria J.C., Fratta D. Introduction to discrete signals and inverse problems in civil engineering. ASCE Press, Virginia, 1998, 327 p.

Silva Gomes A.F., Silva Matos D. Quantitative analysis of dam monitoring results, state of the art, applications and prospects. XVth International Congress on Large Dams, Lausanne, vol. I, ICOLD, 1985, pp. 749-761.

St-Arnaud G. The high pore pressures within embankment dams : an unsaturated soil approach. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 32, n°6, 1995, pp. 892-898.

Willm G., Beaujoint N. Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France, problèmes anciens et solutions nouvelles. IXth International Congress on Large Dams, Istanbul, vol. III, ICOLD, 1967, pp. 529-550.

Windisch E., Høeg K. Pore pressure in the till core of Oddatjorn dam. 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, 2000, pp. 231-238.

Young P. Data-based mechanistic modelling of environmental, ecological, economic and engineering systems. *Environmental Modelling & Software*, n°13, 1998, pp. 105-122.

Cellule	α_Z	η_Z (jours)	Diffusivité ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)
Niveau 52 NGF (zone de marnage)			
CV33	0.27	33	4
CV23	0.38	33	5
CV13	0.39	23	8
Niveau 40 NGF (zone saturée)			
CV32	0.47	25	60
CV22	0.49	33	50
CV12	0.38	10	100
Fondation			
CV31	0.43	28	100
CV21	0.43	56	60
CV11	0.51	32	100

Tableau 1 : Résultats de l'analyse retard des mesures de cellules (figure 11b).
Results of delayed response analysis of cells data (figure 11b).

Cellule	α_Z	η_Z (jours)	Diffusivité ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)
Coupe rive gauche			
CV33	0.27	33	4
CV32	0.47	25	60
PID9	0.42	45	40
PID10	0.23	45	40
Coupe centre			
CV23	0.38	33	5
CV22	0.49	33	50
PID8	0.29	30	30
PID3	0.21	31	50
Coupe rive droite			
CV13	0.39	23	8
CV12	0.38	10	100
PID7	0.28	18	50
PID6	0.53	22	100
PID5	0.16	91	20

Tableau 2 : Résultats de l'analyse retard des mesures de cellules et de piézomètres (figure 11).
Results of delayed response analysis of cells and piezometers data (figure 11).

Piézomètre	Part explicative retenue	Part explicative pluie	α_Z	η_Z (jours)	α_Q (jours)	η_Q (jours)
PZ 17	60%	24%	0.32	0	273	38
PZ 14	54%	23%	0.14	0	147	53
PZ 18	62%	19%	1.00	0	815	39
PA 4	21%	52%	0.46	0	1016	32

Tableau 3 : Résultats de l'analyse retard des mesures de piézomètres.
Results of delayed response analysis of piezometer data.

Cellule	α_Z	η_Z (jours)	Diffusivité ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)
Niveau 488.50 NGF (interface barrage/fondation)			
C1	0.44	0	-
C2	0.28	0	-
C3	0.07	0	-
Niveau 497 NGF (corps du barrage)			
C4	0.25	35	1.5
C5	0.21	35	2.0
C6	0.06	43	1.8

Tableau 4 : Résultats de l'analyse retard des mesures de cellules (figure 16b).
Results of delayed response analysis of cells data (figure 16b).

Piézomètre	Part explicative retenue	Part explicative pluie	α_Z	η_Z (jours)	α_Q (jours)	η_Q (jours)
Rive droite						
PD1	87%	6%	0.77	5	77	39
PD2	53%	6%	0.33	4	33	19
PD3	21%	6%	0.21	3	24	13
PD4	17%	45%	0.04	0	54	52
PD5	12%	54%	0.05	3	76	34
PD6	24%	46%	0.09	0	106	54
PD7	86%	10%	0.85	7	156	66
PD8	21%	49%	0.20	30	198	65
Rive gauche						
PG1	88%	6%	1.00	3	109	63
PG2	73%	9%	0.30	5	34	16
PG3	23%	36%	0.07	3	39	22
PG4	16%	49%	0.05	11	54	40
PG5	32%	31%	0.71	3	608	83

Tableau 5 : Résultats de l'analyse retard des mesures de piézomètres (figure 16a).
Results of delayed response analysis of piezometer data (figure 16a).

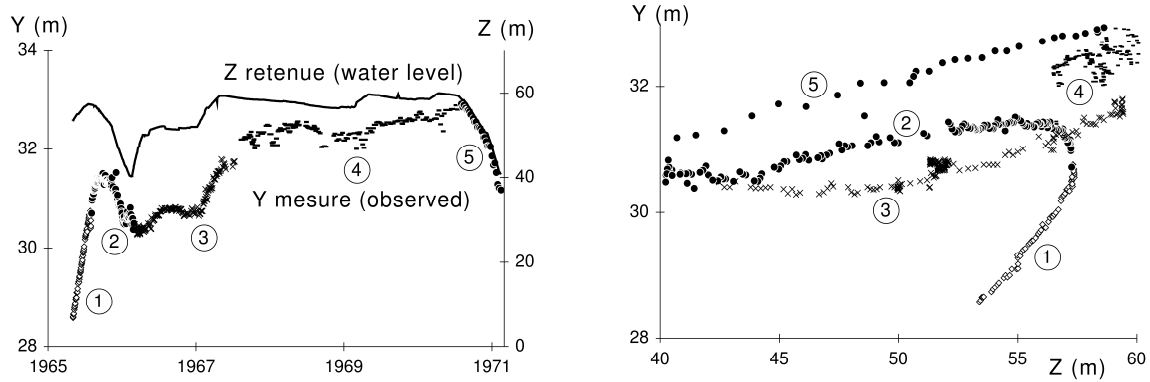


Figure 1. Exemple de mesure piézométrique, niveaux piézométriques en fonction du temps et du niveau de la retenue, hystérésis d'un cycle de hausse/diminution de la retenue.

Example of piezometer data, piezometric head vs. time, piezometric head vs. water level, hysteresis of a cyclic rise/drop in the water level.

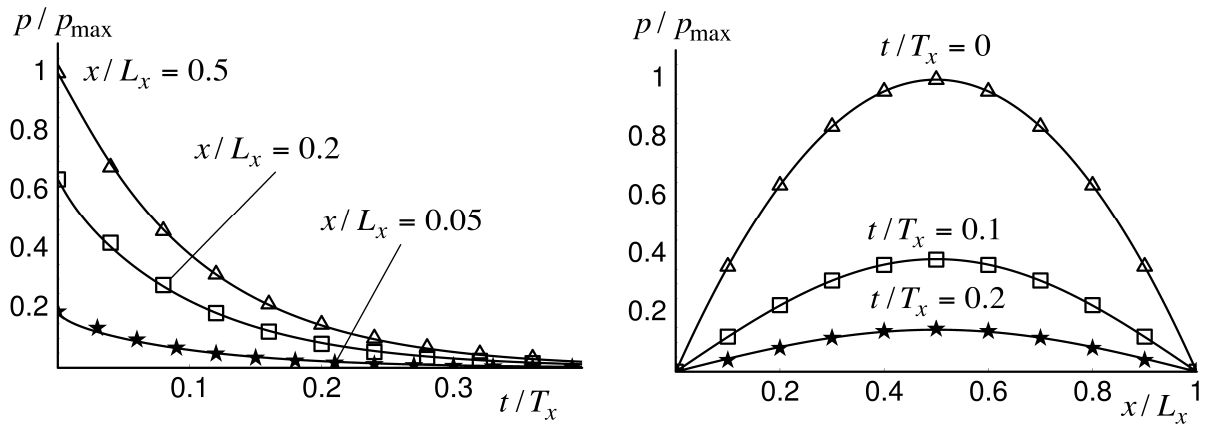


Figure 2. Condition initiale, évolution temporelle et répartition spatiale (traits pleins : solution exacte, symboles : modèle retard).

Initial condition, temporal evolution and spatial profile (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

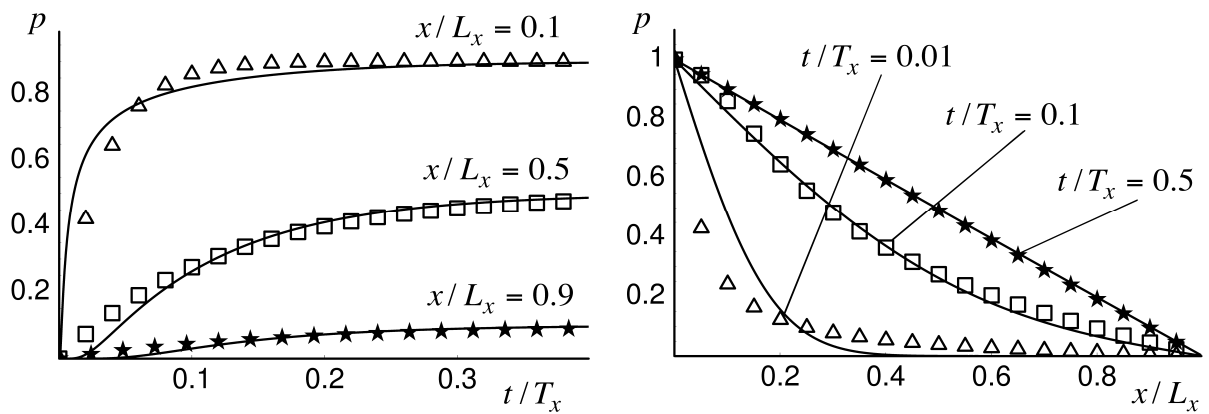


Figure 3. Échelon de Dirichlet, évolution temporelle et répartition spatiale (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Dirichlet unit step, temporal evolution and spatial profile (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

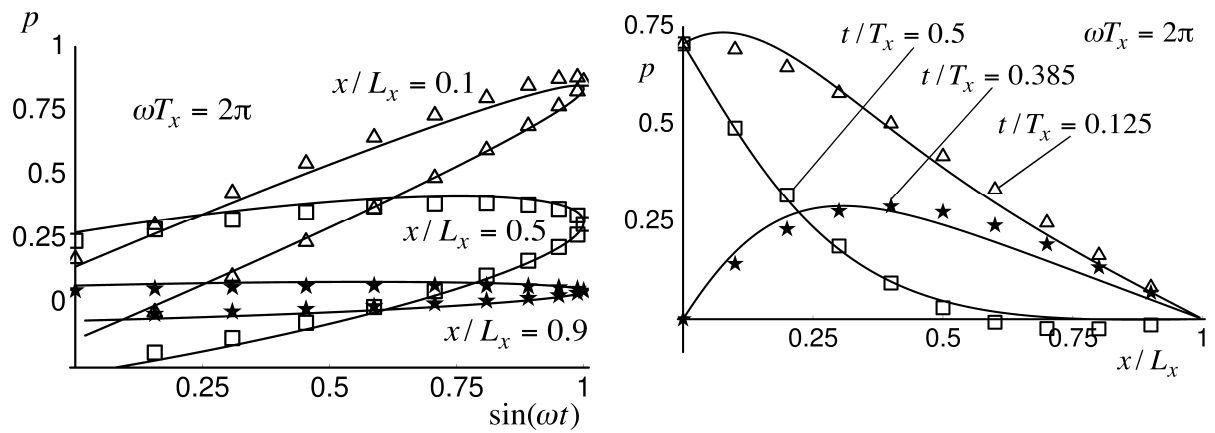


Figure 4. Sollicitation harmonique, évolution temporelle et répartition spatiale (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Harmonic loading, temporal evolution and spatial profile (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

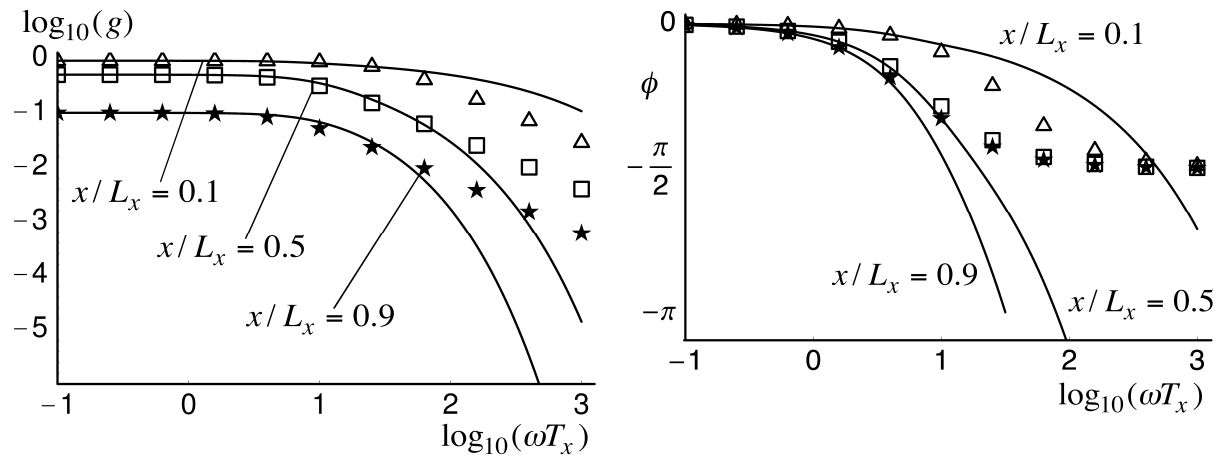


Figure 5. Sollicitation harmonique, diagrammes logarithmiques (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Harmonic loading, logarithmic diagrams (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

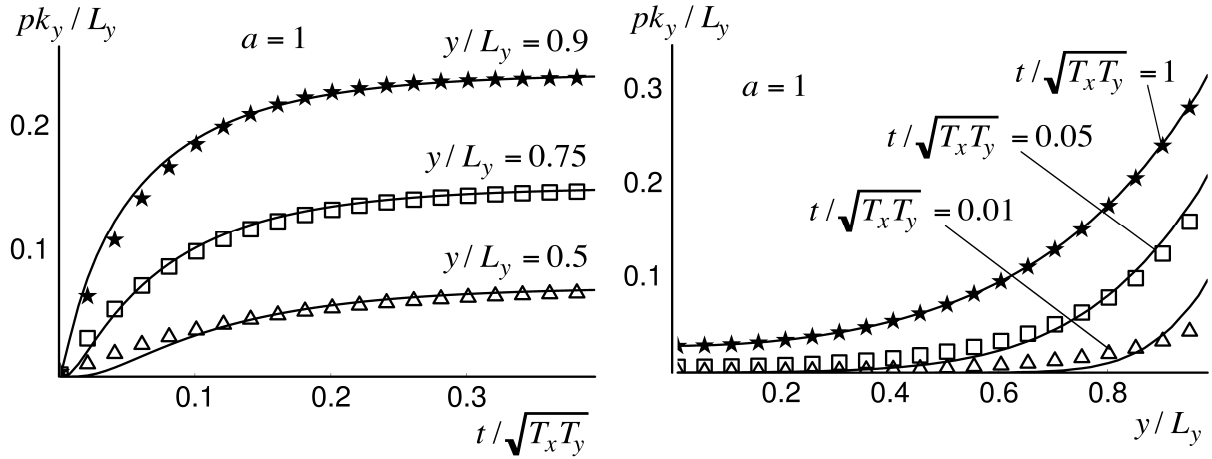


Figure 6. Échelon de Neumann, évolution temporelle et répartition spatiale pour $x / L_x = 0.3$ et $a = 1$ (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Neumann unit step, temporal evolution and spatial profile for $x / L_x = 0.3$ and $a = 1$ (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

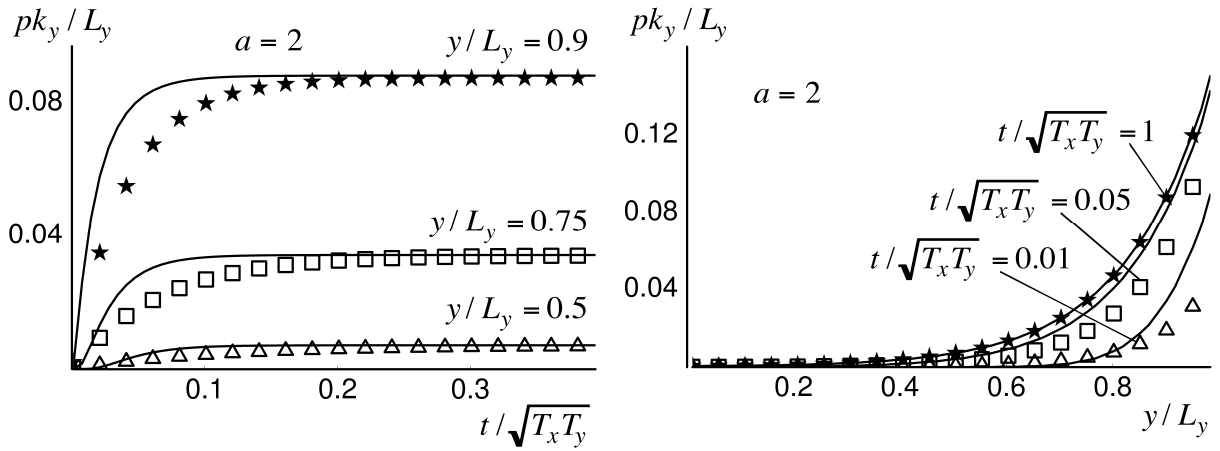


Figure 7. Échelon de Neumann, évolution temporelle et répartition spatiale pour $x / L_x = 0.3$ et $a = 2$ (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Neumann unit step, temporal evolution and spatial profile for $x / L_x = 0.3$ and $a = 2$ (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

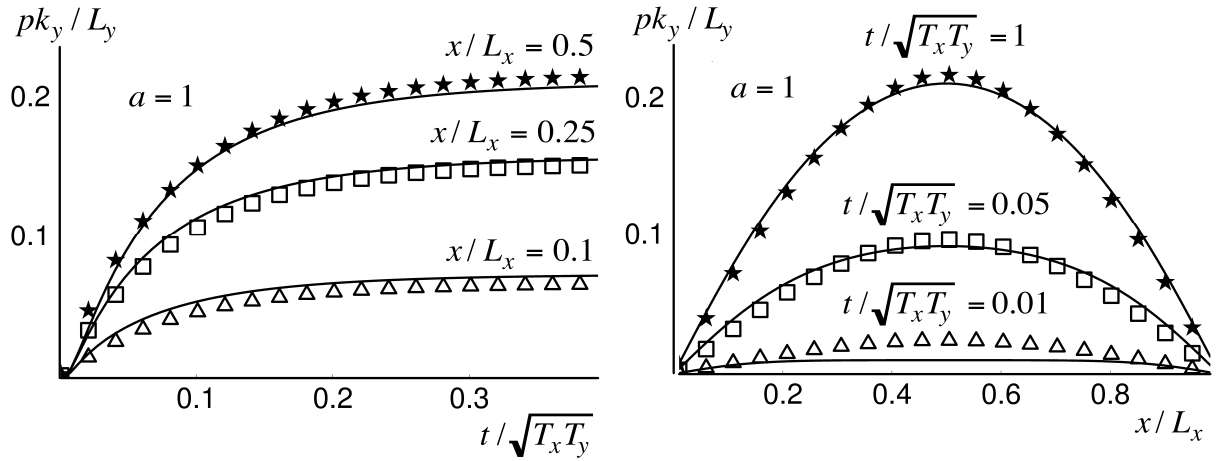


Figure 8. Échelon de Neumann, évolution temporelle et répartition spatiale pour $y/L_y=0.8$ et $a=1$ (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Neumann unit step, temporal evolution and spatial profile for $y/L_y=0.8$ and $a=1$ (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

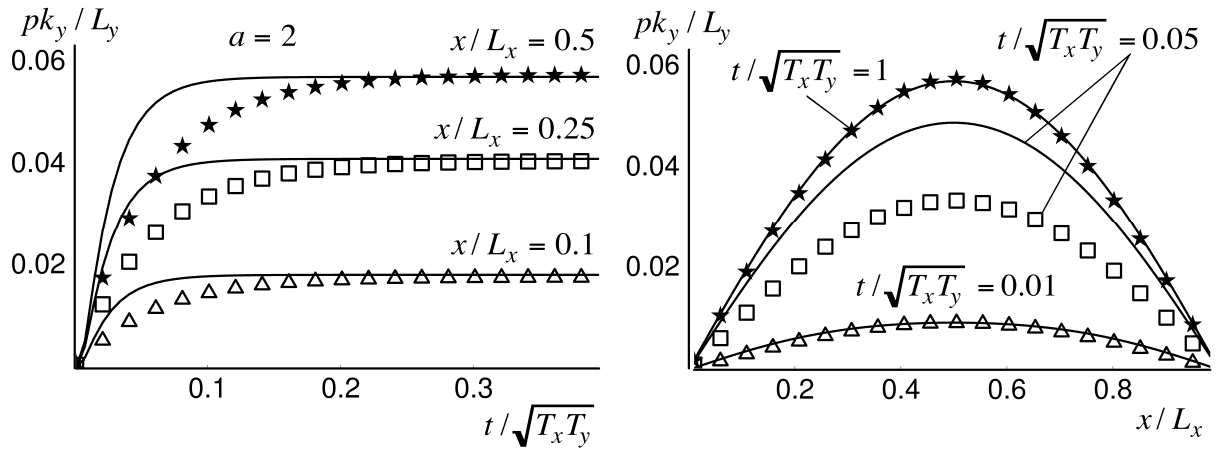


Figure 9. Échelon de Neumann, évolution temporelle et répartition spatiale pour $y/L_y=0.8$ et $a=2$ (traits pleins : solution exacte, symboles : modèles retard).

Neumann unit step, temporal evolution and spatial profile for $y/L_y=0.8$ and $a=2$ (solid lines: exact solution, symbols: delayed response model).

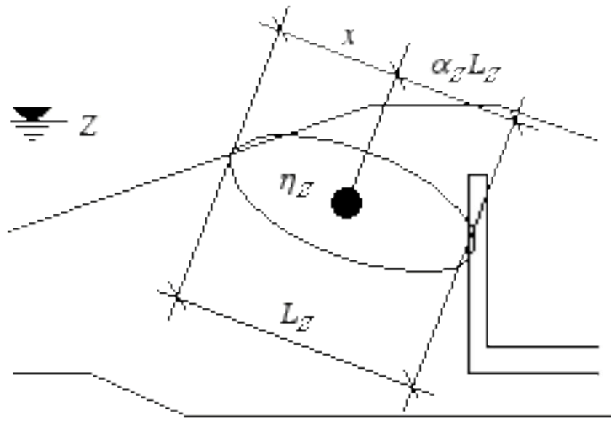


Figure 10. Les paramètres α_Z et η_Z peuvent être interprétés pour des mesures dans le corps d'un barrage : α_Z est la distance relative du point de mesure à l'exutoire, η_Z est le temps caractéristique du point de mesure, L_Z est la longueur moyenne de drainage.

Parameters α_Z and η_Z can be specified for an instrument placed in the body of the dam: α_Z is the relative distance of the measurement point to the drainage system, η_Z is the characteristic response time of the measurement point, L_Z is the mean length of the drainage path.

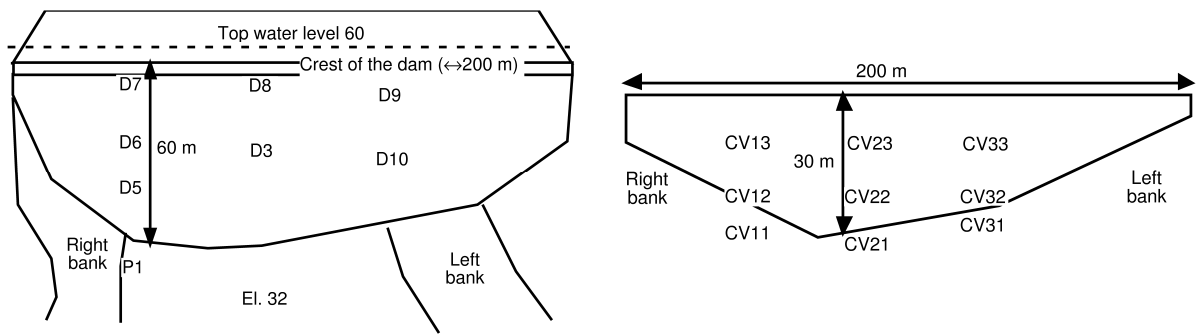


Figure 11. Vue en plan et implantation des piézomètres, profil en long de l'axe (vue de l'aval) et implantation des cellules de pression interstitielle.

Location map of piezometers in the plan of the dam site, location map of the cells in the longitudinal profile (from downstream).

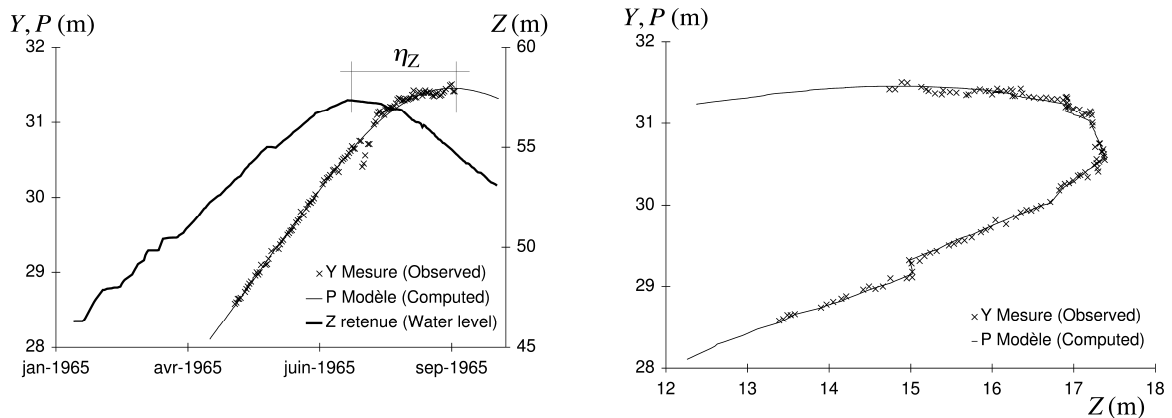


Figure 12. Analyse retard du piézomètre P1 durant le remplissage, niveaux piézométriques en fonction du temps et en fonction de la retenue ($\eta_Z \approx 83$ jours).

Delayed response analysis of P1 piezometer during the impounding phase, piezometric head vs. time ($\eta_Z \approx 83$ days), piezometric head vs. water level.

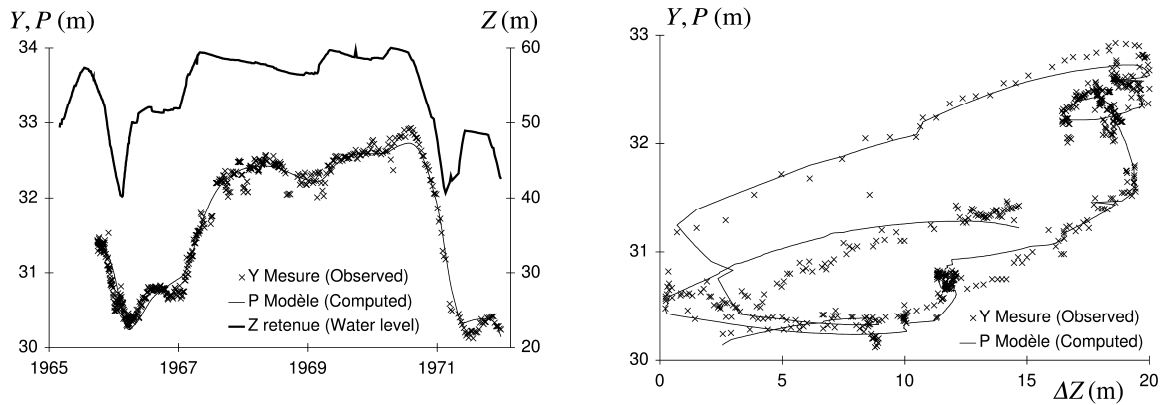


Figure 13. Analyse retard du piézomètre P1 durant l'exploitation, niveaux piézométriques en fonction du temps et en fonction de la retenue.

Delayed response analysis of P1 piezometer during the exploitation phase, piezometric head vs. time, piezometric head vs. water level.

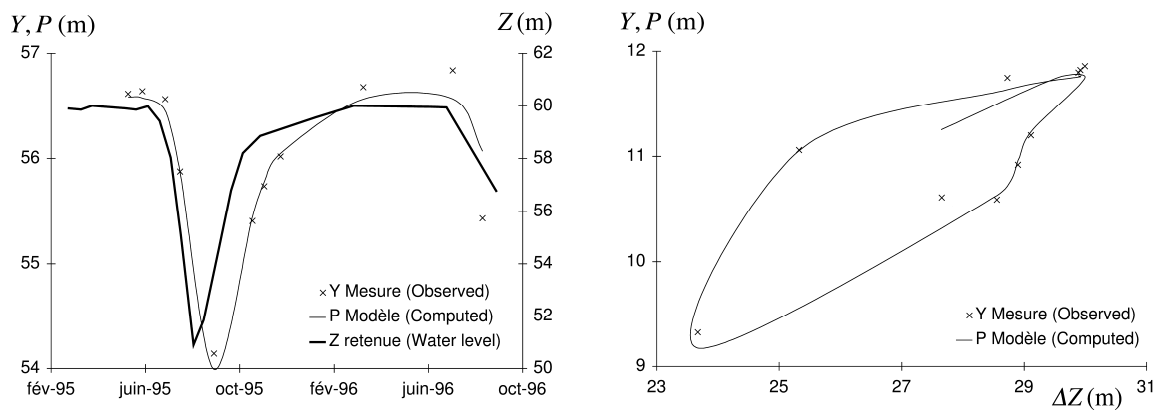


Figure 14. Analyse retard de la cellule CV13, niveaux piézométriques en fonction du temps et en fonction de la retenue ($\eta_Z \approx 23$ jours).

Delayed response analysis of CV13 cell, piezometric head vs. time, piezometric head vs. water level ($\eta_Z \approx 23$ days).

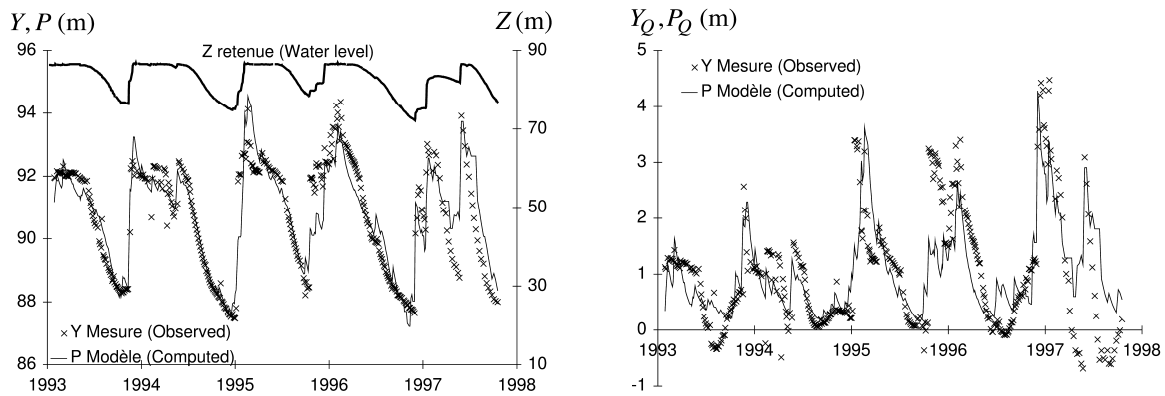


Figure 15. Analyse retard du piézomètre PZ17, niveaux piézométriques en fonction du temps, influence de la pluie en fonction du temps.

Delayed response analysis of PZ17 piezometer, piezometric head vs. time, rainfall effect vs. time.

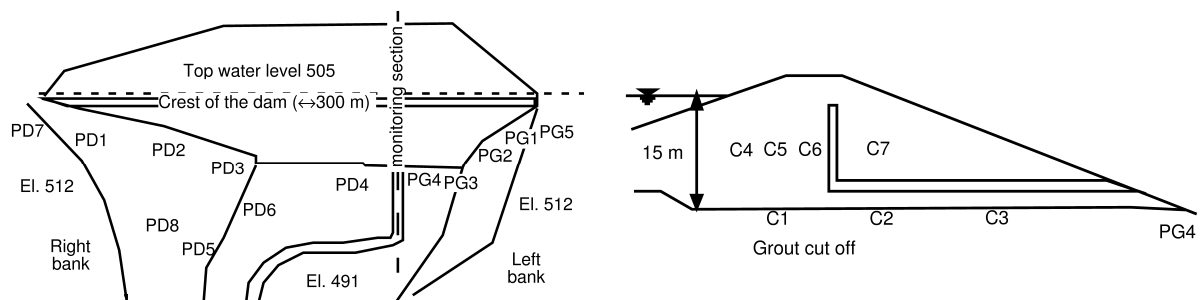


Figure 16. Vue en plan et implantation des piézomètres, coupe amont/aval du barrage dans l'axe ausculté et implantation des cellules de pression interstitielle.

Location map of piezometers in the plan view of the dam site, location map of the cells in the cross section.